

# Modelo de Simulación del Sistema de Distribución de Combustible (Diesel).S80 VED5.

Alumna: Beatriz de Antonio Casals

## Tabla de contenido

1. Objetivo.....	1
2. Descripción del Problema. ....	2
3. Análisis del Sistema Real .....	3
4. Modelo GT Interfaz Usuario:.....	4
5. Descripción del Modelo .....	5
5.1. Datos de entrada.....	5
5.2. Datos de salida. ....	7
6. Ecuaciones utilizadas por el Software para resolver el modelo.....	7
7. Simulaciones.....	9
8. Resultados Técnicos. ....	10
9. Conclusiones.....	11
10. Futuras líneas de trabajo.....	11

## 1. Objetivo.

Construcción de un modelo de simulación que calcule los valores de presión en cualquier punto del Sistema de Distribución del Combustible (diesel, FDS) del vehículo S80 VED5. Este modelo permitirá analizar el sistema de distribución del combustible para las condiciones de funcionamiento del vehículo de caudal y temperatura más desfavorables desde el punto de vista de pérdidas de presión. Servirá de herramienta de identificación de aquellos elementos que impliquen las mayores caídas de presión en el sistema. Además permitirá simular tras realizar modificaciones en los parámetros de diseño de las tuberías y conectores para así analizar el impacto de estas variaciones en las caídas de presión.

Por último, el modelo permitirá verificar si el Sistema de Distribución de Combustible cumple con los requerimientos de caudal y presión para el rango de funcionamiento completo de temperatura y caudal.

## 2. Descripción del Problema.

A continuación se enumeran las principales causas que motivaron que Volvo se interesase en que este trabajo se llevara a cabo y lo publicase entre sus “Máster Tesis” en su página oficial.

- Falta de información sobre la variación de la Viscosidad a baja temperatura.  
Las Hojas de especificaciones de los diferentes tipos de diesel únicamente muestran el valor de la viscosidad a 40°C. Esta información no es suficiente para analizar el comportamiento de la viscosidad a baja temperatura y predecir el impacto en las caídas de presión en el Sistema de Distribución del Combustible (FDS). Hasta el momento la manera en la que se venía analizando el impacto de las altas viscosidades a baja temperatura es mediante la realización de test en el laboratorio utilizando varios componentes o test directamente en el vehículo. Se enfría el diesel hasta la temperatura mínima y a continuación se comienza a bombear el diesel desde la bomba de baja presión en el depósito y se van tomando datos de presión a lo largo del sistema. Sin embargo, pocos minutos desde el comienzo del test los componentes en el vehículo comienzan a aumentar su temperatura y como consecuencia el diesel también. Es necesario por tanto parar el test y reducir la temperatura del combustible hasta la deseada (-40°C). Esto implica una alta inversión de recursos.
- El cálculo de las caídas de presión en el sistema utilizando Excel supone largos procesos de cálculo generando resultados imprecisos.  
Para resolver este problema era necesario asumir alguna de las variables desconocidas como conocida y a continuación calcular la otra variable desconocida. Las dos variables sin determinar son: caudal a la salida de la bomba de baja presión y la presión a la salida de la bomba de baja presión. Sin embargo, una vez fijado el caudal para un valor cualquiera y realizado el cálculo de las caídas de presión desde el regreso al depósito aguas arriba hasta la salida del depósito (punto B, Ilustración 1), la presión obtenida no era compatible con las especificaciones técnicas de la bomba luego el problema no conseguía resolverse satisfactoriamente.
- Falta de una herramienta adecuada para:
  1. Identificar de manera rápida los elementos que suponen las mayores caídas de presión y por lo tanto aquellos en los que hay que concentrarse a la hora de resolver problemas de altas presiones eficientemente.
  2. Simulación del sistema tras realizar variaciones de los valores de los parámetros de diseño.
  3. Negociar con proveedores. Gracias a simples simulaciones es posible generar resultados que apoyen iniciativas por parte de los empleados de Volvo como por ejemplo cambiar un proceso de fabricación o un parámetro de diseño.

Por lo tanto, para conseguir llevar a cabo este trabajo se comenzó por solucionar las anteriores dificultades.

En primer lugar se solicitó test de medida de viscosidad en el rango completo de temperatura  $T [-50, 100] ^\circ\text{C}$  al laboratorio de VolvoCars para así poder tener la información de cómo varia la viscosidad de las 4 muestras de diesel seleccionadas en función de la temperatura y quedase caracterizado el comportamiento del diesel en el software.

Por otro lado GT Suite Software calcularía en pocos minutos las variables del fluido de interés resolviendo las ecuaciones generales de termodinámica en lugar de las hojas de Excel que se utilizaban.

Por último, el modelo construido con GT Suite serviría de herramienta capaz de:

1. Identificar de manera sencilla aquellos elementos que introducen mayores caídas de presión en el sistema.
2. Simular tras realizar variaciones en los parámetros de diseño de algunos elementos
3. Facilitar el proceso de negociación con proveedores.

### 3. Análisis del Sistema Real

En la siguiente ilustración puede observarse el un esquema del sistema de distribución del combustible, Ilustración 1. Las líneas en azul muestran el circuito cerrado que corresponde con la parte del sistema que se pretende representar en el modelo. Como puede verse, la mayor parte del circuito corresponde a la parte de de baja presión a excepción de las tuberías de acero que alimentan la bomba de alta presión (HPP), el trayecto de refrigeración dentro de la bomba de alta presión y la tubería de acero de regreso desde HPP.

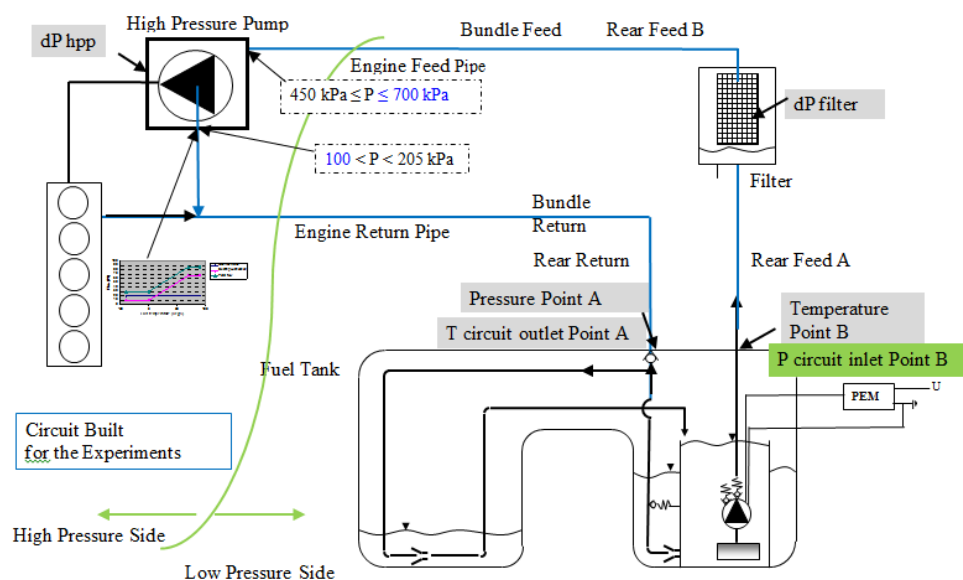


Ilustración 1. Esquema General Sistema de Distribución del Combustible

En el modelo se definirán cada uno de los componentes desde el punto B en la ilustración anterior, hasta el punto A. Los elementos incluidos entre estos dos puntos son: el filtro, la HPP, los jet pumps (interior depósito), y todas las tuberías ("*Rear Feed A*", "*Rear Feed B*", "*Bundle Feed*", "*Steel Feed*", "*Steel Return*", "*Engine Return*", "*Bundle Return*" y "*Rear Return*"). El modelo irá calculando la caída de presión en cada elemento desde el punto A hasta llegar al B, la salida del combustible desde el depósito que corresponde con la caída de presión total a lo largo del Sistema. Inicialmente por simplicidad, se comenzó considerando el punto A la entrada en el depósito y el punto donde la presión es 1 bar pero después de ir introduciendo mayor detalle en el modelo (efecto de los "*jet pumps*") el punto que establecía la condición de contorno A paso a ser el regreso del diesel a la bomba de baja presión, punto situado después de los "*jet pumps*".

Los puntos críticos que han de cumplir con los requerimientos de presión son el punto que corresponde a la entrada y la salida de la bomba de alta presión y los valores de presión requeridos se pueden ver en la figura anterior.

Para construir el modelo se realizan una serie de simplificaciones del sistema real.

Las simplificaciones asumidas son las siguientes:

1. Las tuberías son consideradas rectas y de sección transversal y material constante.
2. El filtro, el tramo de refrigeración en el interior de la bomba de alta presión y los "*jet pumps*" son representados en el modelo como una caída de presión dependiente del valor del caudal.
3. La entrada de calor por parte de los elementos PTC del filtro no se ha considerado en el modelo. Ningún tipo de transferencia de calor es considerado en el modelo de Circuito Completo siendo la temperatura del diesel a la entrada del circuito y a la salida de éste la misma.

#### 4. Modelo GT Interfaz Usuario:

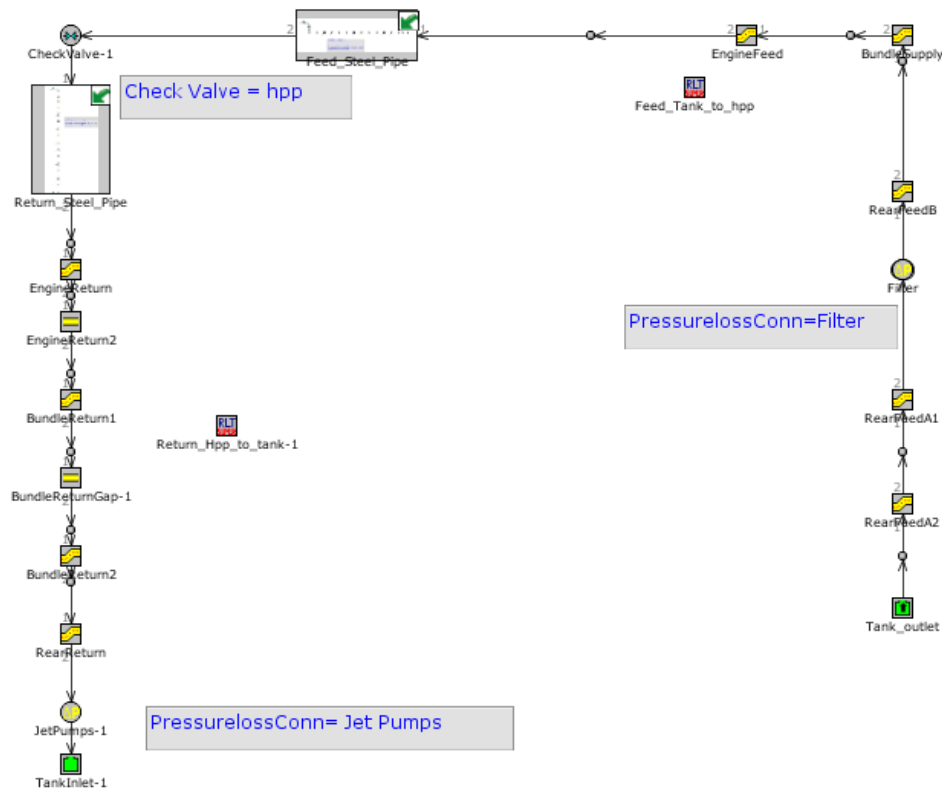
A continuación se muestra la forma que adquiere el modelo una vez construido usando GT Suite. Este Modelo no es el único construido pero sí el más completo luego una vez comprendido los elementos de éste se entiende el resto de modelos construidos.

Tal y como se ha mencionado anteriormente el modelo irá calculando la caída de presión en cada elemento desde el punto A hasta llegar al B (Ilustración 1).

Los objetos que aparecen en el modelo (Ilustración 2) son tuberías (rectas o con cambio de dirección), objetos "*pressureloss*" (utilizados para representar el filtro y los "*jet pumps*") y un objeto "*checkvalve*" que representa la caída de presión que sufre el diesel en el tramo de refrigeración de la HPP.

Los recuadros verdes son "*end environment objects*" que para ser definidos ha de introducirse las condiciones de contorno que el software utilizara para resolver las ecuaciones generales de la

termodinámica. El objeto “*tank inlet*” se define introduciendo la composición del diesel en ese punto, la temperatura y la presión (1 bar). En cambio el objeto “*tank outlet*” se define introduciendo la composición del diesel, la temperatura y el valor del caudal. El modelo permite introducir un valor concreto o un vector y lo que se hace es introducir tanto para la temperatura del fluido como el caudal a la salida del depósito un vector con valores dentro del rango posible de funcionamiento.



**Ilustración 2. Modelo Circuito Completo (3D)**

## 5. Descripción del Modelo

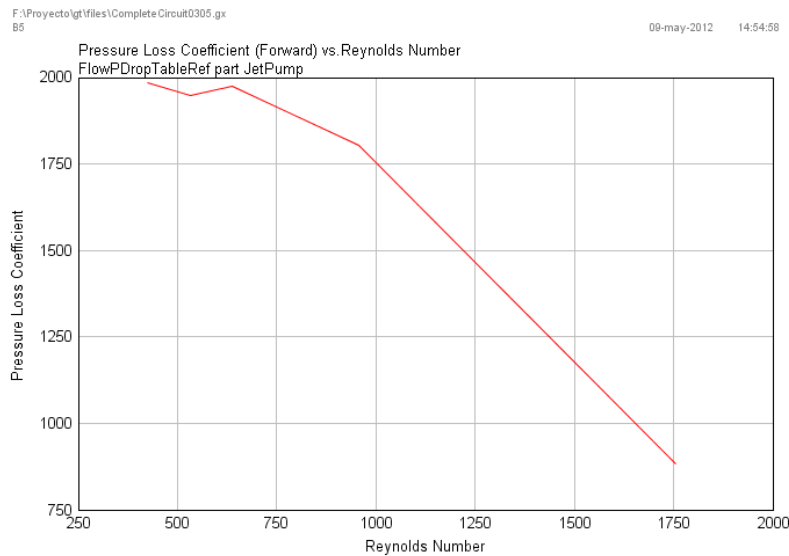
### 5.1. Datos de entrada.

- Curvas de Viscosidad frente a temperatura.  
El modelo se alimenta con los valores de viscosidad correspondientes al rango de temperatura completo para los cuatro tipos de diesel. Para ello se solicita al laboratorio test de viscosidad de estas 4 muestras de combustible.
- “*Pressure Loss Components*”. Este elemento disponible en GT Suite permite la representación mediante una caída de presión en función del caudal de combustible de cualquier elemento con un diseño de mayor complejidad. Este objeto se ha utilizado para la representación del filtro y los “*jet pumps*” (interior del depósito de combustible). En el caso del filtro los valores de entrada se obtuvieron mediante

experimentos reales y en el caso de los “*jet pumps*” estos datos fueron utilizados de test ya realizados anteriormente por Bosch (proveedor).

La ventaja de utilizar este objeto de caída de presión es que mediante la toma de medidas a diferentes valores de caudal de la caída de presión el comportamiento del fluido queda representado para el rango completo de temperatura y caudal. Y no sólo para el diesel utilizado en los experimentos sino para cualquier diesel. De hecho el diesel utilizado en los experimentos en el laboratorio es el B10 y sin embargo, se ha simulado empleando el diesel B5.

Esto es debido a que el software a partir de la tabla de valores de caída de presión versus caudal calcula la grafica representada a continuación, Ilustración 3.



**Ilustración 3. Grafica Coeficiente de pérdida de presión Versus Número de Reynolds**

A partir de esta grafica el modelo es capaz de calcular para una presión y temperatura determinada cual es el Número de Reynolds correspondiente. Conocido el Número de Reynolds, el  $C_p$  se obtiene de la grafica anterior y a continuación la caída de presión correspondiente.

- En el caso del recorrido de refrigeración de la bomba de alta presión se ha utilizado un objeto llamado “*Check Valve*”. Este objeto también requiere de valores de caída de presión para diferentes caudales. Estos datos se consiguieron realizando experimentos en el laboratorio.

## 5.2.Datos de salida.

- Identificación de los elementos que introducen una mayor caída de presión en el sistema.
- Impacto en la caída de presión tras la modificación de algún parámetro de diseño de tuberías y conectores.
- Gráficas mostrando los valores de presión en los puntos del sistema sujetos a requerimientos para el rango funcionamiento de caudal y temperatura completo ( $Q[20, 200] \text{ l/h}$  y  $T [-50, 100] \text{ }^\circ\text{C}$ ).

## 6. Ecuaciones utilizadas por el Software para resolver el modelo.

El sistema Completo es discretizado en múltiples sub volúmenes. Estos volúmenes se comunican por fronteras. Las variables escalares (presión, temperatura, densidad, energía interna, entalpía, etc..) se consideran de valor constante en cada volumen. Las variables vectoriales (flujo de masa, velocidad, fracción de flujo másico, etc) se calculan en cada frontera. Este tipo de discretización es conocida por “staggered grid”.

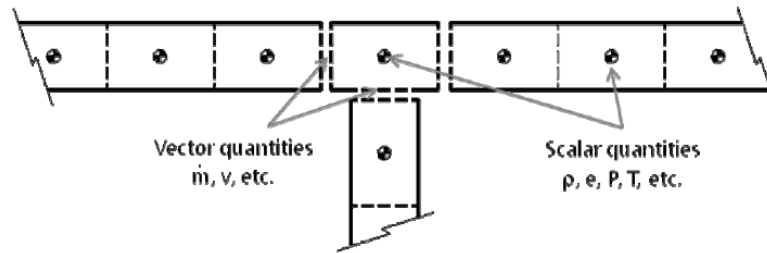


Ilustración 4. Staggered Grid.

Existen dos métodos alternativos de cálculo, el método explícito y el implícito.

GT Suite resuelve utilizando las ecuaciones generales de la termodinámica, Navier Stokes:

$$\text{Continuity : } \frac{dm}{dt} = \sum_{boundaries} \dot{m}$$

$$\text{Energy : } \frac{d(me)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{boundaries} (\dot{m} H) - hA_s (T_{fluid} - T_{wall}) (\text{explicit\_solver})$$

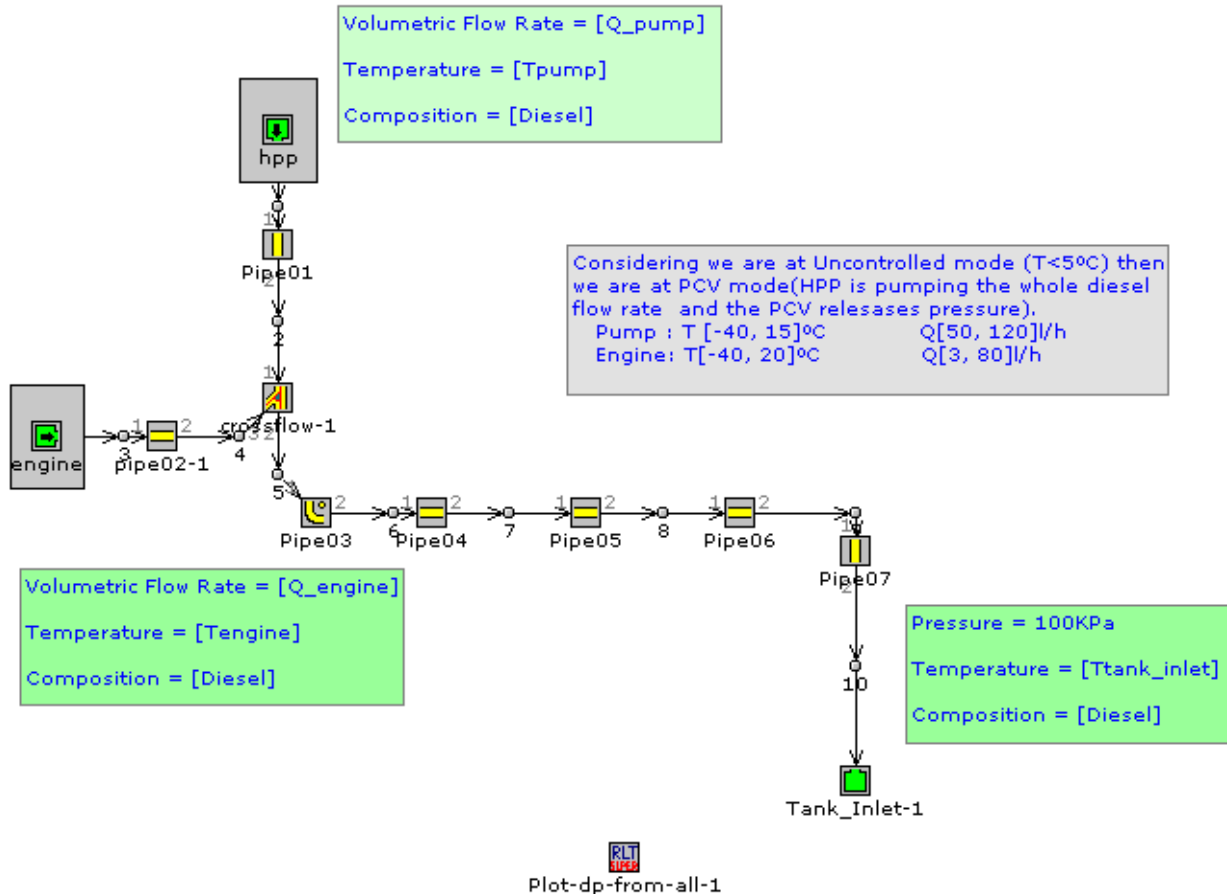
$$\text{Enthalpy : } \frac{d(\rho HV)}{dt} = +V \frac{dp}{dt} + \sum_{boundaries} (\dot{m} H) - hA_s (T_{fluid} - T_{wall}) (\text{implicit\_solver})$$

$$\text{Momentum : } \frac{d(\dot{m})}{dt} = \frac{dpA + \sum_{boundaries} (\dot{m} u) - 4Cf \frac{\rho u |u| dx A}{2D} - Cp(\frac{1}{2} \rho u |u|) A}{dx}$$

El método de solución seleccionada en este trabajo fue el método implícito. La ecuación que resuelve el programa en el caso del método implícito es la de la entalpía. Las variables de solución primarias son el flujo de masa, la presión y la entalpía.

El método implícito calcula los valores de todos los volúmenes simultáneamente, resolviendo el sistema de ecuaciones algebraico. Esto supone un mayor tiempo por “timestep” pero la estabilidad es mayor por lo que es posible elegir un valor de “timestep” mayor.

El modelo siguiente representa el flujo de retorno desde el motor y la bomba de alta presión al depósito. Los recuadros en verde muestran las variables fijadas como condiciones de contorno antes de simular. Puede observarse que el único punto donde el dato de la presión es conocido es la entrada en el depósito de combustible.





## 7. Simulaciones

A continuación se enumeran las diferentes simulaciones realizadas durante este proyecto, por favor véase la versión completa para más información.

1. Ejemplos simples de aplicación de la herramienta GT.
2. Comparación de la Caída de Presión entre los distintos elementos en el sistema. Modelo Simple de Retorno.
3. Modificación de parámetros de diseño de las tuberías.
  - a. Longitud.
  - b. Diámetro.
4. Influencia del ángulo del Conector en Y en la caída de presión.
5. Modelos alimentados con los ficheros de los componentes en 3D (tuberías y conectores).
  - a. Línea de retorno al depósito.
  - b. Línea de alimentación desde el depósito.
6. Comparación de la Caída de Presión entre los distintos elementos en el sistema. Modelo Simple Circuito Completo.
7. Simulación para la obtención de las Gráficas de presión en los puntos del sistema sujetos a requerimientos para el rango funcionamiento de caudal y temperatura completo ( $Q[20, 200]l/h$  y  $T [-50, 100] ^\circ C$ ).

## 8. Resultados Técnicos.

- Análisis de Sensibilidad.

La figura a continuación muestra los valores de caída de presión para el modelo del circuito completo simple, el 3D y los valores obtenidos en los test.

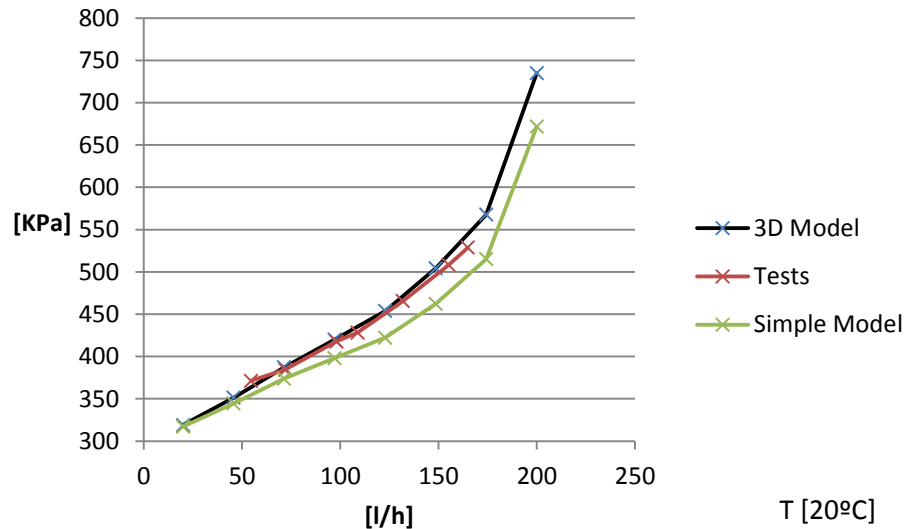


Ilustración 5. Caída de presión total Circuito Completo

- El valor del ángulo del conector en Y en la caída de presión es despreciable ya que la máxima diferencia de pérdida de presión entre los valores de ángulo extremos es de 0.86 KPa.
- Identificación de las tuberías de acero como aquellos componentes críticos que introducen en el circuito las mayores caídas de presión en comparación con el resto de tuberías y conectores.
- El parámetro de diseño de las tuberías de mayor impacto en las caídas de presión es el diámetro, consiguiéndose un 80 % de reducción de la caída de presión al incrementar el diámetro en un 50%.
- La forma del área transversal en las curvas de 90° en las tuberías de acero afecta las caídas de presión notoriamente. La caída de presión de una curva de forma elíptica de 90° es un 70% mayor que la obtenida con una tubería curva de forma circular de 90°.
- Los valores de presión obtenidos tras simular el modelo para el rango completo de presión y temperatura, en la entrada y salida de la bomba de alta presión se encuentran dentro de los límites de presión y caudal requeridos.

## 9. Conclusiones

- Modelos simples pueden construirse para apoyar en los procesos de toma de decisiones en fases de diseño del producto avanzadas cuando se requieren respuestas rápidas.
- Simulaciones sencillas pueden generar graficas de gran valor como apoyo en las negociaciones con proveedores.
- El ángulo del conector en Y en la línea de retorno no influencia significativamente la caída de presión en éste.
- El proceso de fabricación utilizado en las tuberías de acero conlleva una deformación del área transversal en los cambios de dirección de 90° y un aumento importante de las caídas de presión por lo que debe ser remplazado.
- Analizando los resultados tras simular con los modelos simplificados y aquellos alimentados con los ficheros 3D de los componentes, se concluye que los modelos simplificados generan resultados suficientemente precisos y más de manera más eficiente en tiempo empleado para su construcción.
- Los datos obtenidos en los experimentos realizados en el laboratorio verifican los datos generados por los modelos que representan el circuito completo. El Modelo 3D se ajusta bastante bien y el modelo simplificado genera unos valores de presiones un poco inferiores debido a que incluye menor información referente a cambios en el diámetro a lo largo del circuito.
- Los valores de presión obtenidos a la entrada y salida de la bomba de alta presión se encuentra dentro de los límites de presión y caudal requeridos por lo que se concluye que el sistema se ajusta a las especificaciones del sistema de caudal y presión.

## 10. Futuras líneas de trabajo

- Las graficas generadas tras simular con los modelos creados pueden ser usadas como soporte técnico para cualquier diesel cuyo dato de viscosidad sea conocido.  
Otra alternativa es introducir en el modelo la temperatura para la que el diesel que se quiere analizar presenta un valor de viscosidad igual al de uno de los cuatro tipos de diesel definidos en el modelo: B5, B10, B30 y HÖGT. Así se conocería los datos de presión para ese tipo de diesel.
- Representar el efecto de transferencia de calor en el filtro debido a los elementos PTC o bien en la bomba de alta presión.
- Una vez se defina una relación entre el caudal, la temperatura y la transferencia asociada para cada caso, podrá incluirse este efecto en el modelo. Sin embargo las soluciones encontradas hasta ahora no fueron satisfactorias en el sentido que no suponían un acercamiento del comportamiento del modelo a el sistema real. Las opciones probadas fueron la introducción de un flujo de calor dependiente de la temperatura de entrada al

filtro y el valor del caudal. En el caso de la bomba de alta presión debido a los numerosos factores que influyen en el flujo de calor transferido al diesel, no se elaboró ningún modelo de prueba.

- Sustitución de aquellos elementos “no predictivos”.

Al no definirse los parámetros de diseño de algunos elementos en el sistema, estos elementos se dice que son elementos representados con enfoque no predictivo. Los elementos que pertenecen a este grupo serían aquellos que presentan una mayor complejidad: Filtro, Bomba de alta presión y “*jet pumps*”. Todos ellos se representan en los modelos mediante objetos que permiten la introducción de tablas en las que para cada valor de caudal se corresponde una caída de presión. Es por esto que el modelo no calcula la caída de presión sino que esta información se le introduce, es obtenida gracias a experimentos realizados. Esta forma de construcción del modelo “no predictiva” limita el número de análisis que pueden hacerse al simular a posteriori.

Por ejemplo, en el caso de las diferentes tuberías y conectores se puede analizar el impacto de la modificación de la longitud el ángulo de giro, el material, la transferencia de calor por convección o el diámetro.

Este modelo para fases iniciales de desarrollo es adecuado y lo ideal sería continuar introduciendo más detalle y sustituyendo los elementos no predictivos por elementos predictivos. El software ofrece diferentes objetos que pueden utilizarse para que estos elementos adquieran un carácter más predictivo. En el caso del filtro puede sustituirse por un objeto “*orifice*” definiendo múltiples orificios. La bomba de baja presión puede representarse mediante con objeto “*pump*”, requiere la introducción de una tabla de datos en la que queda definido el caudal bombeado para cada valor de presión y el dato de la eficiencia isentrópica.